HEV용 고출력 대용량 리튬 폴리머 배터리(LIPB)의 수학적 모델링 기법 연구

서동우 구자경 김일송
한국교통대학교

The study on the Mathematical modeling techniques for HEV High-power Lithium-Polymer battery

Dongwoo Seo, Jakyeong Koo, Ilsong Kim,
Korea National University of Transportation

ABSTRACT

본 논문은 HEV용 고출력 리튬 폴리머 배터리(LI PB)의 수학적 모델링 기법을 제안한다. 비선형 시스템인 리튬 폴리머 배터리의 전기화학적 특성을 수학적인 상태 방정식으로 표현하고, 배터리 셀의 직접적인 충/방전, 온도 실험을 통하여 셀 모델의 파라미터를 추출하고 표현된 상태 방정식으로 최소의 오차를 가지는 파라미터를 구한다. 대용량 충방전기를 사용한 실험으로 본 연구의 적합성을 입증하였다.

1. 서론

HEV용 전기 자동차의 리튬 폴리머 배터리(Li PB)는 적은 용량(6.5Ah)에 대전류(200A이상) 충전이 가능한 배터리로서, 순간적으로 고출력을 낼 수 있는 특징이 있다. 고출력 배터리는 충방전시 특성이 다르게 나타나는 비선형적인 시스템을 갖고 있으며, 이와 같은 전기화학적인 특성을 수학적인 모델링으로 나타내는 것은 어려운 작업이다. 비선형적인 시스템인 셀 데이터를 가지고 파라미터와 상태변수를 사용하여 수학적인 모델링으로 나타내고자 한다.

본 연구에서는 HEV용 고출력 대용량 배터리를 이용하여 배터리의 수학적 모델링 기법을 제시한다.

시험 측정은 100A급 충방전 장치 및 챔버를 사용하였고 실험을 통해 제시된 모델링의 성능을 검증한다.

2. 본론

2.1 배터리 모델링

배터리의 전기화학적인 특성을 전기회로나 상태방정식으로 표현하게 된다. 이는 배터리의 상태(state), 수명(health)등을 예측하는데 가장 필요한 부분이다.

배터리의 전기적 동적 특성을 다음의 그림 1과 같이 나타낼 수 있으며 배터리의 단자 전압 방정식은

$$V_{bat} = V_{ocv} + Ri_k + V_{p1} + V_{p2} + V_h \tag{1}$$

로 주어진다.

V_{ocv}는 충전량(SOC)로 이루어진 비선형 전압원이고, V_{p1}과 V_{p2}는 분극 현상을 나타내는 커패시턴스와 충방전 전류로 인한 손실저항으로 이루어져 있다. R는 내부저항을 나타내고, Vh는 전지의 Hysteresis 전압을 나타낸다. Hysteresis 전압은 동일 충전량(SOC)에서 충전과 방전시 다르게 나오며 전압 차이는 비례하지 않고 충전량에 따라 달라진다. 충방전 전류는 i_k로 나타내며 충전시(+), 방전시( )의 값을 가진다.

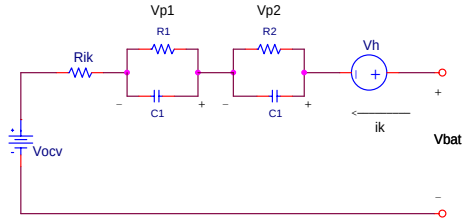

그림 1 리튬 폴리머 전지 회로 모델링
Fig. 1 LIPB Battery dynamic model structure

2.2 수학적 모델링

실험을 통하여 얻어진 데이터로 전지의 개방전압과 히스테리시스 현상을 적용하여 상태 방정식을 수립할 수 있다. 또한 수학적 모델링에 필요한 셀 모델의 파라미터를 추출한다. 파라미터는 최소자승법을 이용하여 추정하였다. 셀 모델의 파라미터 추출을 위해 Enhanced Self Correcting (ESC) Model 을 사용한다.

2.2.1 Enhanced Self-Correcting (ESC) Model

UDDS 프로파일을 통해 셀 파라미터를 변화값을 알아내는 것이 제일 중요하며 Enhanced Self Correcting (ESC)모델링 방법으로 최소의 오차를 가지는 파라미터를 알아낸다.[2] 출력방정식은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다. 충방전을 통해 얻은 OCV데이터와 배터리 내부저항, 분극화를 나타내는 손실저항, 이중층의 커패시턴스를 포함한다.

$$y_k = OCV(z_k) + h_k + filt(i_k) - Ri_k \tag{4}$$

선형필터 $filt(i_k)$을 공간상태 방정식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} f_{k+1} &= A_f f_k + B_f i_k \\ y_k^f &= G f_k \end{aligned} \tag{5}$$

$F(i_k)$는 다음과 같이 정의 한다.

$$F(i_k) = \exp\left(-\left|\frac{\eta_i \cdot i_k \cdot \Delta t}{C_n}\right|\right) \tag{6}$$

최종 상태 공간 방정식으로 나타낸 ESC Model은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} f_{k+1} \\ h_{k+1} \\ z_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} diag(\alpha) & 0 & 0 \\ 0 & F(i_k) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_k \\ h_k \\ z_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_f & 0 \\ 0 & 1-F(i_k) \\ -\frac{\eta_i \cdot \Delta t}{C_n} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_k \\ sgn(i_k) \end{bmatrix} \tag{7}$$

α는 선형 필터의 극점들을 의미한다.

$$sgn(i_k) = 1, i_k > 0 \quad -1, i_k < 0 \tag{8}$$

출력 y_k는 다음과 같다.

$$y_k = OCV(z_k) - Ri_k + Mh_k + Gf_k \tag{9}$$

2.3 실험 결과

본 논문에서 제안된 방법을 검증하기 위해 MATLAB을 사용하였다.

아래의 그림은 파라미터 추출의 결과를 그래프로 나타내었다. 그림 2는 2차와 3차 필터 적용시 시간에 대한 전압 추정 오차를 보여주며, 그림 3은 2차와 3차 필터 적용시 UDDS 사이클에 대한 전압 변동치이며, 그림 4는 2차와 3차필터 적용시 전류의 값을 보여준다.

MATLAB을 통한 파라미터를 추출하고 셀모델의 파라미터 오차를 최소화 시켜 조합을 찾아내는 함수를 찾는다. 최적 파라미터는 SOC 10~90(%) 사이만 적용하였다.

그림 2와 그림 3을 통해 필터 차수에 대한 모델 에러 결과값을 다음과 같이 정의 한다.

$$E = y - \hat{y} \tag{10}$$
$$\cos t = \sqrt{\frac{(EE^T)}{n}}$$

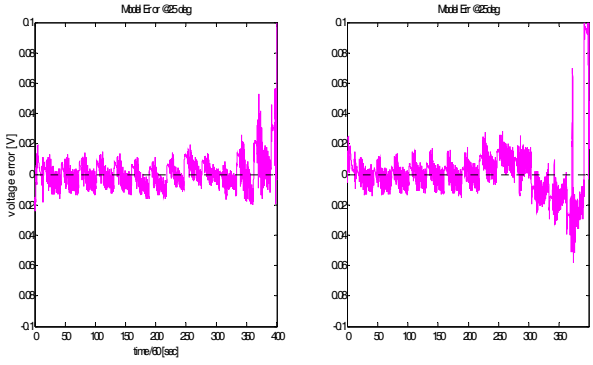

그림 2 시간에 대한 전압 추정 오차 (左 2 차 필터, 右 3차 필터)
Fig. 2 Result for voltage error of time (Left Filter state 2, Right Filter state 3)

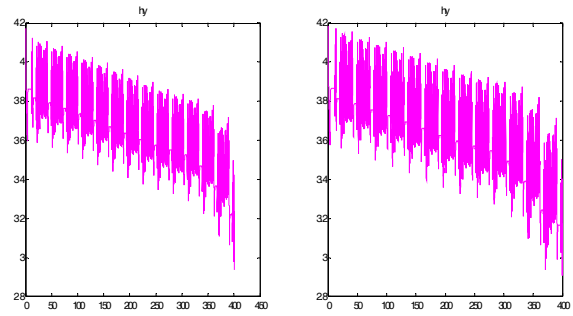

그림 3 UDDS 셀 프로파일 테스트 (左 2차 필터, 右 3차 필터)
Fig. 3 Result of cell modeling for the UDDS cell test. (Left Filter state 2, Right Filter state 3)

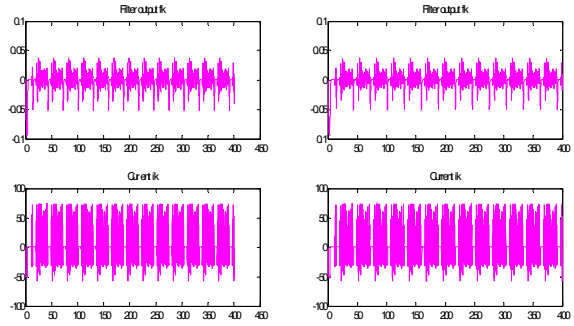

그림 4 필터 F_k와 전류 i_k파일 테스트(左 2차 필터, 右 3차 필터)
Fig. 4 Result of Filter F_k and Current i_k Test.(Left Filter state 2, Right Filter state 3)

2차 필터 적용시 cost는 0.006113 이었으며, 3차 필터 적용 cost는 0.005828 이었다. 3차 필터에서 2차 필터 보다 cost값이 더 작게 나왔지만 고차 필터가 될수록 연산에 따른 계산양이 많아져서 연산 시간이 늘어나고 두 필터에 대한 오차 크기가 크지 않은 점을 감안하였을 때 ESC 모델에서 최적의 필터를 적용하는 것은 2차 필터가 낫다는 것을 볼 수 있다.

3. 결론

본 논문에서는 HEV용 리튬 폴리머 배터리 시스템의 수학적 모델링을 적용하는 방법을 소개하였다. 제안된 시스템의 성능은 고성능 충방전기를 통한 OCV데이터와 UDDS 사이클 시험에 의해 입증되었다. 온도에 따른 파라미터의 변화값에 대한 오차를 최소화하는 파라미터를 구할 수 있었다.

이 논문은 중소기업기술혁신사업(과제번호 SA113271) 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

[1] G. L. Plett, “Extended Kalman Filtering for Battery Management Systems of LiPB based HEV Battery Packs, Part 2. Modeling and Identification”, J. Power Sources, 134, pp. 262 276, 2004.